

# LA PLATEFORME HÉLICANTHE : MODELISATION PHYSIQUE CORDIS-ANIMA TEMPS REEL – GENESIS – 4<sup>E</sup> GENERATION

Claude Cadoz  
ACROE

Claude.Cadoz@acroe-ica.org

## RÉSUMÉ

L'atelier proposé dans ces journées est une approche du paradigme de la modélisation physique *CORDIS-ANIMA* centrée sur la *Plateforme Hélicanthe* de l'ACROE. Celle-ci, dotée de *TGR* (Transducteurs Gestuels Rétroactifs) permet la simulation d'objets physiques multisensoriels, en temps réel avec retour d'effort. Après un rappel des fondements du formalisme *CORDIS-ANIMA* et de l'environnement *GENESIS* qui en permet la pratique pour la création musicale, plusieurs évolutions récentes seront présentées : le premier prototype de la quatrième génération de *GENESIS*, *G-IV*, dédié à la modélisation pour le temps réel avec systèmes gestuels à retour d'effort performants, ainsi que le principe de « l'émulation gestuelle ». Ce dernier permet de créer et d'expérimenter « hors ligne » - en l'absence de *TGR* et en temps différé - des modèles pouvant fonctionner « en ligne » avec toutes les performances requises. Ces procédés seront illustrés avec la pièce *Quetzalcoatl* de l'auteur, où à la dualité temps réel / temps différé s'ajoutent deux formes inédites de dialectiques : entre les gestes effectués réellement sur *TGR* et des gestes émuloés construits en temps différé, et entre deux instrumentistes intervenant en ligne et en temps réel sur deux *TGR* séparés, mais couplés entre eux. Nous concluons sur les perspectives d'écriture du geste ergotique ouvertes pas ces propositions.

## 1. INTRODUCTION

La *Plateforme Hélicanthe*<sup>1</sup> est la plateforme interactive temps réel qui intègre en un outil complet pour la création musicale et multisensorielle les cinq technologies fondamentales développées par l'ACROE :

- *CORDIS-ANIMA (CA)* : formalisme de modélisation physique modulaire pour la simulation multisensorielle des objets physiques<sup>2</sup> [6] ;

<sup>1</sup>*Plateforme Hélicanthe*<sup>®</sup> - Nom déposé. ACROE - Premières présentations publiques : Festival MICROMUSIC – 20 Oct. -20 Nov. 2018 – Romans-sur-Isère ; Journées Présentation *Hélicanthe* –14-15 Janvier 2019 – Ircam – Paris.

<sup>2</sup>*CORDIS-ANIMA* : prototype originel et authentique de la modélisation physique « masse-interaction » introduite par Claude Cadoz et l'ACROE dès 1979.

- *TGR* : « transducteurs gestuels rétroactifs », systèmes mécatroniques d'interface pour l'interaction gestuelle avec retour d'effort et *Claviers Rétroactifs Modulaires* [7][14] ;
- *TELLURIS*, assemblage *TGR* - bloc de traitement électronique des entrées et sorties des capteurs et effecteurs gestuels [14], et calculateur rapide ;
- *GENESIS* : environnement logiciel dédié à la modélisation physique pour la création du son et la composition musicale [10], et en particulier sa toute nouvelle version *G-IV* ;
- *MIMESIS* : environnement logiciel de modélisation physique pour l'image animée [11].

Elle inclut de plus un système de projection audio 24 canaux et un dispositif de projection multi vidéo.

Une vaste bibliothèque de modèles balayant l'espace phénoménologique et interactionnel du processus de la création musicale, de la microstructure sonore à la macrostructure narrative et compositionnelle, lui est associée.

Cet outil est une concrétisation opérationnelle intégrale du paradigme préconisé par l'ACROE situant la « simulation multisensorielle et interactive des objets physiques » (ou « simulation multi sensori-motrice ») au cœur des technologies pour la création musicale, visuelle et multisensorielle à l'aide du numérique. Ce paradigme s'est proposé en tant que généralisation de la création du son par modélisation du signal, alors que Mathews [19], Risset [21], ou Hiller, Issacson et d'autres [13] avaient déjà interrogé les promesses de l'ordinateur comme outil universel pour créer la musique.

L'atelier proposé dans ces journées est une approche du paradigme par la démonstration, abordant la question cruciale de la *nomadicité* des systèmes à technicité exigeante comme c'est le cas des systèmes à retour d'effort. Il est aussi l'occasion de présenter plusieurs nouvelles fonctionnalités propres à *G-IV*, premier prototype de la quatrième génération de *GENESIS*, dédié à la modélisation *CORDIS-ANIMA* temps réel, déployé par Nicolas Castagné avec l'équipe de développement informatique de l'ACROE.

L'atelier présentera également le principe de « l'Émulation gestuelle » développé par l'auteur (§5), qui, tout en permettant d'articuler de manière agile les situations en ligne et hors ligne, introduit de nouvelles

modalités de dialogue, entre performances instrumentales réelles et émulées. Celles-ci ont été mises en application dans deux pièces récentes *Hélios*<sup>3</sup> et *Quetzalcóatl*<sup>4</sup> (§6). La seconde illustre deux autres formes de dualité, entre scènes musicales et visuelles entièrement fixées et de grande complexité et scènes proposant à l'expérience multi sensori-motrice des objets issus du modèle matrice, simulables en temps réel. Dans ce qui suit, on va tout d'abord évoquer les conditions nécessaires aux performances requises pour la simulation multisensori-motrice.

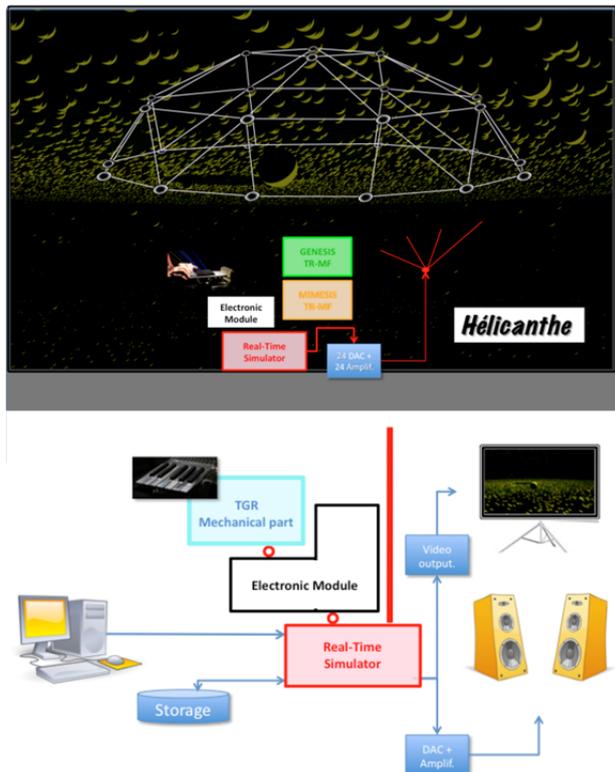


Figure 1. La Plateforme Hélicanthe.

## 2. POSITIONNEMENT GENERAL

La synthèse sonore et musicale par ordinateur dispose aujourd'hui de nombreux outils largement diffusés et accessibles. Dans ce contexte, la synthèse sonore et musicale par simulation des instruments physiques réels ou potentiels, appelée « Synthèse par modèle physique », tient une place de choix eu égard aux critères de la qualité et de la richesse sonores. De plus, associée à des systèmes d'interaction gestuelle à retour d'effort, elle permet de retrouver, dans le contexte de créations infiniment possibles du numérique, la qualité et la finesse du geste instrumental réel [1, 2, 3, 4].

Or, ces techniques sont aujourd'hui difficiles à utiliser par tout un chacun ne serait-ce que parce qu'elles demandent un haut niveau de technicité.

Plusieurs catégories de démarches cherchent à proposer solution à ce réel dilemme ou à le décadrer.

Une première catégorie consiste à simplifier les techniques de base, aussi bien de simulation que d'interaction gestuelle, quand bien même leurs performances s'en trouveraient dégradées. Il existe ainsi un ensemble de recherches et de développements proposant des dispositifs gestuels à faible coût ou à faible technicité dont l'objectif principal, tout à fait légitime et nécessaire, est de permettre à tout un chacun et en particulier aux compositeurs ou aux chercheurs de travailler à leurs projets par eux-mêmes et sans assistance complexe.

Une deuxième catégorie est celle préconisée et pratiquée par un compositeur comme György Kurtag qui suggère de compenser l'absence de systèmes de niveau technique suffisant par une intériorisation cognitive de leurs possibilités [15]. Ce déplacement cognitif, sur le geste par exemple, permet de travailler « en absence » de son support souhaité. On peut affirmer sans trop se tromper que tous les instrumentistes connaissent cette pratique « mentalisée », bien qu'elle soit éminemment personnelle et intime. Cette intériorisation cognitive peut, sans aucun conteste, faire partie d'un apprentissage. Elle peut aussi être tout à fait bénéfique lorsque l'apprenti mentalisé se retrouve devant le support *absentéisé* redevenu réel.

Une troisième catégorie préférera profiter du décadrage proposé par les nouvelles technologies de l'information pour ouvrir à de nouveaux paramètres de la création musicale, et laisser les gestes fins de l'instrumentiste – par exemple ce qui se passe au contact même de la touche de piano – à l'activité intime de l'instrumentiste. Ainsi, on note un intérêt croissant pour la partie spatiale et scénique du geste, souvent en lien avec d'autres arts et en particulier la danse et les arts de la scène. Bien que ces différentes démarches aient leurs propres qualités et nécessités musicales et esthétiques, tout se passe comme si ne pouvant résoudre un problème, nous nous y résolvions et nous tournions vers un ailleurs.

Or, il existe une réponse scientifique et technologique à ce dilemme, tout en restant parfaitement compatible avec les autres approches présentées synthétiquement ci-dessus. Ainsi, la démarche proposée ici a pour objet de mettre à disposition des utilisateurs (chercheurs, pédagogues, musiciens) de nouvelles technologies de collaboration permettant à la fois (1) de disposer « chez soi » de la souplesse des outils de synthèse numérique et (2) en studios spécialisés des outils très performants non encore décentralisables. Ces concepts et technologies adressent en particulier ce que nous nommons ici « inter-instrumentalité », « émulation gestuelle », « nomadicité ».

<sup>3</sup> *Hélios*, C. Cadoz – Plateforme Hélicanthe ACROE, 2016.

<sup>4</sup> *Quetzalcoatl*, C. Cadoz, Plateforme Hélicanthe ACROE, 2018.

### 3. PERFORMANCES REQUISES POUR LA CREATION ARTISTIQUE

#### 3.1. On ne peut pas sacrifier la performance des systèmes à retour d'effort

Le retour d'effort dans la simulation multisensorimotrice doit remplir des conditions de performance sérieuses. Le sens « tactilo-proprio-kinesthésique » [4] est un sens fin et élaboré à qui il faut s'adresser avec des dynamiques, des résolutions et un nombre de degrés de liberté suffisants, distribués dans des espaces complexes et de géométries variées. Les gestes qui le portent ne sont pas réductibles à des extensions du *click* sur souris. Nous avons pu établir par exemple qu'il fallait parfois fournir des forces de plusieurs centaines de newtons en quelques centièmes de millisecondes pour atteindre la véricité perceptive à travers le canal haptique [4, 14]. Or celle-ci est décisive dans la création des artefacts permettant d'approcher les sensibilités de l'expression artistique. Une telle intensité ne peut être atteinte sans « effort » (c'est le cas de le dire !) et un moteur d'entrée de gamme juste suffisant pour simuler les stylos à bille ne saurait prétendre à la fonction.

##### 3.1.1. Critères de qualité des TGR

La qualité des TGR tient à un certain nombre de facteurs : propriétés mécaniques, inertie, élasticités des composants mobiles, viscosité des articulations et guidages, morphologies des *end effectors*<sup>5</sup>, résolution et ambitus des capteurs de position, résolution et ambitus des forces produites par les effecteurs, bande passante, temps de réponse, etc. De nombreux travaux antérieurs de l'ACROE et d'autres laboratoires de recherche sur les systèmes haptiques ont montré que certaines réductions, anamorphoses et/ou changements d'échelle parfois drastiques sont possibles sans briser la nature et les caractéristiques signifiantes du geste [1, 2, 9, 12]. Les mêmes études montrent aussi que des réductions anodines peuvent avoir des conséquences catastrophiques, compromettant toute « plausibilité » du simulateur et affectant l'efficacité des interactions [5].

##### 3.1.2. Nécessité d'une métrologie

D'une manière générale il n'est pas possible d'anticiper les conséquences de telle ou telle réduction sans une part importante d'expérimentation. Ceci suppose alors l'existence d'outils appropriés. Les TGR de référence de l'ACROE ont été conçus avec cette exigence métrologique, et avec pour première fonction de permettre la caractérisation qualitative et quantitative des phénomènes du geste instrumental. Il se trouve que cette disposition, à travers ce que l'on appellera plus loin une « métrologie spéculaire » (§5.3), en fait égale-

ment des outils pour le prototypage des systèmes haptiques et pour la caractérisation des systèmes candidats à la fonction TGR. Ceci ne diminue évidemment en rien leur pertinence pour la création musicale (§6).

#### 3.2. Performance de la simulation

##### 3.2.1. Performance algorithmique

La performance de la simulation par modèle physique est tout aussi cruciale. Elle se joue en premier lieu dans l'optimalité des algorithmes, ce qui peut exiger d'aller examiner en détail comment ceux-ci se comportent au niveau du code de calcul au plus proche du processeur.

Cette condition d'optimalité, qui doit garantir également la plus grande généralité, n'est pas simple. La construction du formalisme modulaire *CORDIS-ANIMA* (§4.1) a été portée par cette double exigence [6]. La nécessité de l'économie matérielle a alors conduit à celle de la cohérence conceptuelle. Cette dernière porte une garantie de longévité plus fiable que celle des machines elles-mêmes. En fait, le formalisme *CORDIS-ANIMA*, 40 ans après sa conception, tient toujours sa place. Cœur et âme de *GENESIS* et *MIMESIS*, il est aussi le prototype générique de la modélisation physique masses-interactions<sup>6</sup> modulaire.

##### 3.2.2. Réactivité et puissance de calcul

La performance du principe de simulation étant assurée, celle du processus de calcul doit l'être à son tour. Quatre conditions distinctes sont à considérer ici :

- Celle d'une base de temps absolument régulière à tous les niveaux de la chaîne de simulation (signaux d'entrée gestuels, simulation physique gestuelle, simulation physique acoustique, sorties gestuelles, sonores et visuelles), dont l'absence fait perdre tout sens aux notions de vitesses et d'accélération, i.e. au calcul différentiel en temps lui-même ;
- Celle du pas de simulation, c'est à dire de l'intervalle de temps à l'intérieur duquel toute la simulation doit se dérouler. Ce pas de simulation est réglé d'une part par la stabilité numérique des algorithmes discrets et d'autre part par la fréquence de Shannon requise pour obtenir la dynamique fréquentielle voulue ;
- Celle du synchronisme, c'est à dire de la correspondance univoque entre un instant d'entrée  $T_i$  et un instant de sortie  $T_j$  de l'algorithme, et ce, quel que soit le pas de calcul imposé par l'algorithme ;
- Celle de la latence minimum entre les échantillons d'entrées et de sorties, en particulier du système haptique, latence exprimée en nombre d'échantillons. Cette latence est au mieux de 1 échantillon.

<sup>5</sup> Dispositifs de géométrie spécifiques permettant diverses adaptations à la main et au geste en fonction des applications: morphologie adaptable de type clavier de piano, stick 2D, 3D, 6D, pinces, archets...

<sup>6</sup> Aussi parfois appelé « en réseaux newtoniens ».

En réponse à ces 4 conditions, l'implantation des architectures temps réel de l'ACROE fonctionne avec un pas de temps régulier de 5kHz à 44,1 kHz (Conditions 1 et 2), est absolument synchrone (conditions 3) et « à l'échantillon près » (Condition 4) [18].

### 3.2.3. Pertinence du modèle

Critère plus difficile à cerner, celui de la « pertinence » du modèle peut être approché avec un raisonnement en forme de condition nécessaire vs condition suffisante.

S'il est impossible d'associer la pertinence ou la richesse d'un phénomène au nombre d'éléments qui constituent le processus de son engendrement, il est certain qu'il existe des cas qui ne seront atteignables qu'à la condition de convoquer un très grand nombre de composants. La réciproque est bien évidemment fautive ! En fait, il est de toute façon justifié d'avoir la possibilité de simuler le plus grand nombre de composants possibles.

### 3.3. Nomadicité

Quoi qu'il en soit, que l'on sente la proximité des limites et nous n'aurons de cesse que de trouver toutes les bonnes raisons de vouloir les dépasser. Ceci induit que la possibilité, par exemple, de simuler de très grandes structures, quitte à ce que ce soit en temps différé, ou bien encore des structures mues par un très grand nombre d'instrumentistes par le moyen d'une incroyable diversité de TGR, quitte à... simuler ces derniers, est une raisonnable folie pour laquelle il y a diverses thérapies. La vie en temps différé n'est en effet pas une calamité ! Surtout si elle permet la préméditation ou l'intériorisation de la vie en temps réel, et à condition qu'elle soit une manière d'approcher mieux la performance ou de se concentrer sur les aspects compositionnels qui sont par nature « hors temps ».

Par ailleurs, à l'heure du « tout par Internet » et du tout « low-cost » une croyance commence pourtant à se dissiper ; celle qui considère que le monde n'aurait ni légitimité ni futur en dehors de ces deux normes<sup>7</sup>. Or, l'accès large à des fonctionnalités exigeantes comme le retour d'effort ou la simulation multi sensori-motrice ne peut se faire en réduisant linéairement leurs performances.

Ce qui importe alors n'est pas seulement de pouvoir travailler en temps réel ou en temps différé, mais que les situations hors ligne et en ligne puissent s'articuler et que les bénéfices de l'une servent ceux de l'autre.

Nous appelons « nomadicité » la fonctionnalité qui permet l'articulation en ligne / hors ligne.

<sup>7</sup> Demandez à un montagnard qui se prépare pour une ascension du Mont Blanc ce qu'il pense de qui prétendrait l'effectuer en espadrilles au motif que celles-ci coûtent moins cher que des chaussures de montagnes ! Quant à effectuer la « ballade » par Internet...

## 4. GENESIS QUATRIEME GENERATION - G-IV

### 4.1. Rappels sur le formalisme CORDIS-ANIMA

Pour la description intégrale de ce formalisme, on se reportera à [6]. Nous rappelons ses éléments essentiels.

#### 4.1.1. Rupture paradigmatique

Il y a une rupture paradigmatique fondamentale entre la synthèse par modèle de signal et la simulation par modèle physique introduite avec CORDIS-ANIMA.

Dans la première, dont le prototype originel est *Music V*<sup>8</sup> [19], le paradigme est celui des *blocs fonctionnels à flux de données orientés* introduit par Max Mathews : les données d'entrée d'un module sont les données de sortie de modules qui le précèdent.

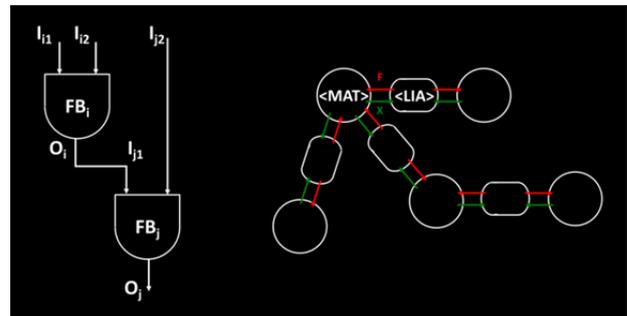


Figure 2. De *Music V* (gauche) à *CORDIS-ANIMA* (droite).

La simulation par modèle physique CORDIS-ANIMA (CA) reprend le principe de blocs modulaires, mais avec une différence fondamentale : les relations entre les modules sont intrinsèquement *bidirectionnelles*. En effet, elles doivent pouvoir rendre compte de la nature elle-même bidirectionnelle des interactions physiques. Le deuxième principe de la physique de Newton est celui de « l'action-réaction » entre deux corps en interaction. Par essence, celle-ci nécessite deux variables complémentaires pour sa description mathématique fondamentale, l'une dite *intensive* et l'autre *extensive* [16, 17].

Or c'est l'ordinateur lui-même, et tous les systèmes de traitement numérique, qui sont fondés sur le schéma entrée/traitement/sortie orienté. Et il est strictement impossible de changer le fonctionnement principal de tout dispositif de traitement numérique classique. Le fondement de CORDIS-ANIMA réside dans la recherche d'un principe pour représenter, dès les parties les plus élémentaires, des relations essentiellement bidirectionnelles dans un monde où tout est orienté.

La première étape consiste à considérer deux catégories de flux de données : les données de force (la variable intensive retenue) et les données de positions (la variable extensive retenue) et à introduire une notion de « point de communication » bidirectionnel, qui est

<sup>8</sup> Que l'on retrouve dans C-Sound et dans tous les procédés de synthèse sonore numérique actuels.

entrée pour une des deux catégories et sortie pour l'autre. Ces entrées et sorties sont des paires indissociables. Cette disposition conduit à deux types de points de communication, ceux qui reçoivent des forces et produisent des positions et ceux pour lesquels c'est l'inverse. Le formalisme *CORDIS-ANIMA* les appelle respectivement « points <M> » et « points <L> ».

L'étape suivante introduit deux notions : celle « d'objet » *CORDIS-ANIMA* et celle de « connexion » entre points de communication. Un objet *CA*, formellement, est une entité dotée d'un certain nombre de points de communication, éventuellement des deux catégories. Une « connexion » est la mise en relation entre ces points de plusieurs objets, selon le principe de l'utilisation des sorties de l'un des points comme entrées d'un autre. Il vient immédiatement que l'on ne peut que connecter des points <L> à des points <M>, mais pas des points de même type entre eux. Et il vient également, du fait de la répartition des variables en forces et en positions que l'on peut connecter plusieurs points <L> à un même point <M> mais pas plusieurs point <M> à un même point <L>. Soulignons sans nous y attarder qu'il s'agit d'une expression de la loi de Kirchhoff avec laquelle les réseaux *CA* sont en cohérence.

Quelques raisonnements simples (que l'on trouve dans l'article cité plus haut) conduisent à mettre en évidence que le système d'objets de base le plus simple et le plus générique est constitué de deux objets : l'un qui contient un seul point de connexion, de type <M>, que l'on appelle « élément matériel » et l'autre qui ne contient que deux points de connexion, de type <L>, que l'on appelle « éléments de liaison ». Les premiers s'appellent les éléments <MAT>, les seconds les éléments <LIA>.

Un objet *CORDIS-ANIMA* est alors un assemblage d'éléments <MAT> et <LIA> selon les règles de connexion rappelées plus haut, par des points de communication <M> et <L>. C'est un réseau dont les nœuds sont des modules fonctionnels et de calcul <MAT> et les arcs des modules fonctionnels et de calcul <LIA>.

Pour la simplicité de la représentation graphique, en particulier dans *GENESIS* (§4.2), on représente les éléments <LIA> par de simples traits. Ceci est pratique, mais dangereux pour qui va trop vite : en effet, les traits des <LIA> ne sont pas des connexions, mais des algorithmes d'interaction. De fait, dans cette représentation, les points de connexion sont devenus implicites. Ils se cachent, par paires à chacune des extrémités des éléments <LIA>.

#### 4.1.2. *CORDIS-ANIMA est multisensoriel*

C'est en effet un formalisme de modélisation des *objets physiques*. Les propriétés prises en considération ne sont pas perceptuelles (auditives, visuelles ou haptiques) mais mécaniques (inertie, élasticité de la matière, friction etc.). Les algorithmes de simulation calculent à partir de ces dernières les états successifs des

éléments de cette « matière virtuelle » à chaque pas de l'échantillonnage temporel. La relation aux sensorialités se fait en fonction de dispositions qui n'ont pas d'incidence sur les propriétés simulées : visualisation des mouvements des points de la matière dans une représentation tridimensionnelle en perspective, extraction du signal acoustique à partir des mouvements de quelques points sélectionnés, et, dans les simulations en ligne, réception et production des signaux haptiques à partir ou à destination d'autres sélections de points particuliers.

#### 4.1.3. *Les « modules » de CORDIS-ANIMA et la boucle de simulation*

Ce sont des séquences algorithmiques réalisant chacune la simulation d'un élément physique simple. Elles sont divisées en deux catégories : les modules <MAT> qui élaborent des grandeurs de positions à partir de grandeurs de forces, les modules <LIA> qui élaborent des grandeurs de forces à partir de positions. La boucle de simulation, – et c'est l'identité et l'originalité même de *CORDIS-ANIMA* à son fondement<sup>9</sup> – s'appuie sur cette dualité et se partage en deux phases, l'une dédiée aux modules <LIA> et l'autre aux modules <MAT> séquencés dans cet ordre. En voici les principaux représentants :

**Modules <MAT>** : La masse élémentaire **MAS**, le point fixe **SOL**, l'oscillateur mécanique élémentaire **CEL**, l'entrée de position **ENX**, la sortie de force **SOF**.

**Modules <LIA>** : le ressort élémentaire linéaire **RES**, le frottement visqueux élémentaire linéaire **FRO**, l'assemblage élémentaire ressort-frottement **REF**, la collision élastique élémentaire **BUT**, les interactions non linéaires élastiques et visqueuses **LNL**, les entrées de forces **ENF**, les sorties de positions **SOX**.

## 4.2. Rappels sur *GENESIS*

*GENESIS* [6][10] est l'interface utilisateur qui permet de pratiquer la modélisation physique *CORDIS-ANIMA* pour créer des séquences musicales et multisensorielles. Les modèles sont construits en disposant sur un « Établi » les modules <MAT> pris dans la colonne de gauche de la « Palette » et en installant entre eux des modules <LIA> pris dans la colonne de droite (fig. 3). Les paramètres de chaque élément sont saisis dans des menus appropriés et en fonction des sélections effectuées sur l'établi. Le lancement des simulations ainsi qu'un très grand nombre de fonctionnalités permettant la visualisation, l'écoute, l'analyse modale des structures, etc. sont proposées à travers diverses ergonomies sur lesquelles on ne s'étendra pas ici.

<sup>9</sup> Selon les architectures de calcul dites *systoliques*.

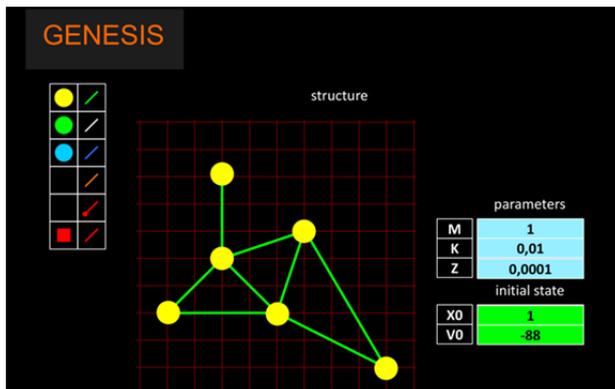


Figure 3. L'Établi de l'interface *GENESIS*.

Soulignons alors cet aspect important du protocole d'utilisation : le modèle est d'abord construit de la manière que l'on vient d'indiquer, puis, lorsqu'il est correct et simulable, la simulation peut être lancée, pour une durée que l'on décide. À chaque instant il est possible d'effectuer une écoute de ce qui a été calculé, mais le décours du calcul et celui de l'écoute sont dissociés. Même si le temps nécessaire au calcul est plus court que la durée du son lui-même, l'écoute n'est pas en temps réel. Pour cette raison, *GENESIS* n'était pas, jusque-là, compatible avec les situations de simulations multi sensori-motrices « en ligne », avec des *TGR*. En revanche, il est depuis toujours parfaitement fréquentable dans toutes les situations nomades. *G-IV* et « l'émulation gestuelle », chacun de leur façon et de manières complémentaires, mettent un terme à cette situation.

#### 4.3. *GENESIS - IV*

Issus des travaux de l'équipe de développement informatique de l'ACROE, sous la responsabilité de Nicolas Castagné, le logiciel *GENESIS-IV* (*G-IV*) est le premier prototype de la quatrième génération de *GENESIS*. Il reprend et actualise la totalité de ses ergonomies antérieures, bénéficiant d'une longue expertise et de nombreuses remontées des utilisateurs, chercheurs, artistes, compositeurs. Et il intègre au niveau profond des fonctionnalités essentielles pour la modélisation destinée à la simulation temps réel en ligne. Il est exécutable sur la *Plateforme Hélicanthe* avec ses systèmes gestuels à retour d'effort performants. *G-IV* peut recevoir un modèle quelconque développé dans les versions antérieures de *GENESIS* quelles qu'elles soient.

##### 4.3.1. Partage du modèle en parties haute et basse fréquences

Tout modèle peut être scindé en deux parties correspondant respectivement aux zones mécaniques proches du geste (des *TGR* donc) dont les comportements sont bas en fréquence (du continu à quelques KHz), et aux zones mécaniques sièges de phénomènes à fréquences acoustiques. La simulation se fait alors selon

deux fréquences différentes adaptées à ces deux parties, communiquant entre elles, ce qui permet une optimisation appréciable du temps de calcul.

Les fréquences de calcul pour chaque partie peuvent être choisies, en général 44,1KHz pour la partie haute et « n » (entier) fois plus petite pour la partie basse. Chaque module peut être déclaré haute ou basse fréquence, avec la possibilité pour ses paramètres d'être automatiquement convertis pour que ses propriétés se conservent au changement de fréquence.

##### 4.3.2. Affectation aux *TGR*

Enfin, et là est une chose précieuse, une Masse (*MAS*) peut être déclarée comme « étant un *TGR* » : l'icône qui lui est associée prend alors la forme d'un triangle avec quelques dégradés originaux à la place du petit disque jaune des Masses « normales » et l'on doit spécifier quel numéro de *TGR* réel doit lui être associé. Celui-ci doit bien sûr exister et être connecté, mais, dès lors, c'est lui qui enverra ses positions à la simulation et qui recevra les forces de celle-ci, s'activant pour les répercuter au doigt qui le presse ou le saisit.

## 5. ÉMULATION GESTUELLE -METROLOGIE SPÉCULAIRE

Le présent chapitre introduit ce que nous appelons « l'émulation gestuelle » qui, faisant d'une pierre deux coups, va permettre d'une part la mise en œuvre au sein de *G-IV* de méthodologies pour la métrologie des *Transducteurs Gestuels Rétroactifs*, telles qu'elles s'imposent à tout instrument digne de ce nom (§5.1), d'autre part la possibilité de travailler également hors ligne pour la conception et l'expérimentation de modèles dédiés au temps réel en ligne. Le principe de départ consiste à intégrer au modèle une partie qui va jouer le rôle des *TGR* en leur absence, en essayant de faire en sorte que le résultat de la simulation soit en tout point identique dans les situations *en-* et *hors* ligne.

### 5.1. Métrologie générale

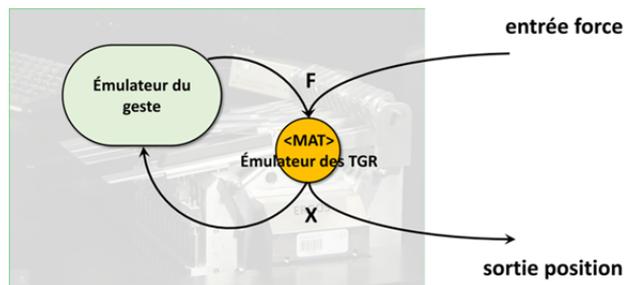
Partons du fait que l'expérience est multi sensori-motrice : elle engage des actions gestuelles qui provoquent des perceptions auditives, visuelles et tactilo-proprio-kinesthésiques. Il faut donc pouvoir comparer celles-ci dans les deux situations réelle et simulée.

Il convient tout d'abord d'être prudent quant à une comparaison qui porterait sur les perceptions exclusivement. Les sciences cognitives et de la psycho-perception nous ont largement alertés sur l'absence d'isomorphie entre l'espace des paramètres physiques et celui des paramètres perceptifs [20, 21, 22]. Heureusement, nous disposons, du côté de l'action comme des perceptions, de tous leurs antécédents objectifs : les signaux de capture des gestes et les signaux destinés aux transducteurs acoustiques, visuels, gestuels. La question

de l'identité des résultats peut alors se transposer à ce qui constitue la phénoménologie objective de l'action-perception : leurs traces et représentations numériques. L'identité des résultats devient celle des mesures sur les phénomènes objectifs qui les accompagnent. C'est là qu'une métrologie générale de l'interaction multi sensori-motrice, phénomènes et systèmes, à commencer par celle des systèmes *TGR*, peut se fonder.

## 5.2. Émulation des *TGR* / Émulation des gestes

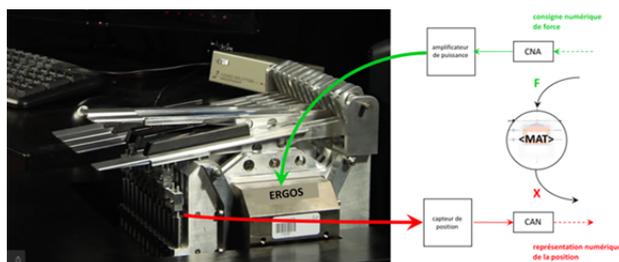
Nous présentons maintenant le principe global de l'émulation gestuelle qui consiste à substituer (1) le vrai *TGR* et (2) les gestes qui lui sont appliqués par des modèles *CORDIS-ANIMA*. Nous appellerons « émulation des *TGR* » la première substitution et « émulation du geste » la seconde (fig. 4).



**Figure 4.** Émulation gestuelle : Émulation des *TGR* / Émulation du geste.

### 5.2.1. Émulation des *TGR*

Un *TGR* se caractérise par des propriétés mécaniques (§3.1.1) : inertie, rigidité, frictions linéaires et non linéaires de leurs composants ou émergence de leurs morphologies. La figure ci-dessous (fig. 5) montre un dispositif *TGR* de l'ACROE à 12 degrés de liberté appelé *CRM* et la façon dont il est connecté à un modèle *CORDIS-ANIMA*. À droite de la figure, l'élément *<MAT>* représente le *TGR* au sein de *CA*.

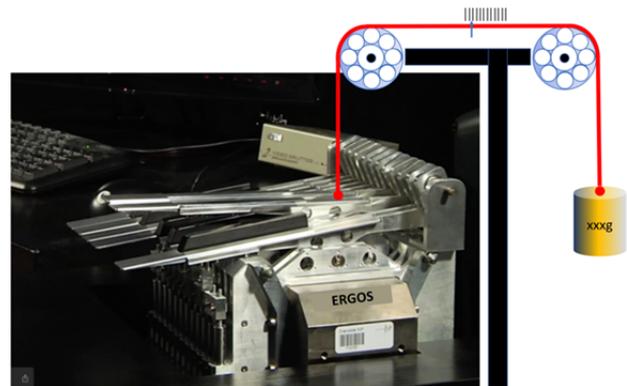


**Figure 5.** Le Clavier Rétroactif Modulaire (*CRM*) ACROE - ERGOS Technologies.

Le fait que la touche d'un *CRM* soit au repos dans une position basse indique la présence d'un poids, et donc d'une inertie. Le poids peut être mesuré avec un dispositif de pesée simple tel que le montre la photographie augmentée (fig. 6).

Cette mesure permet de connaître le poids apparent du système au point d'action du moteur linéaire

vertical<sup>10</sup> et, par conséquent l'inertie de la touche. Ce dispositif et cette mesure suggèrent un premier modèle simple d'une tranche *TGR* du *CRM* sous la forme d'une masse *MAS* d'inertie  $M_{TGR}$  dans le formalisme *CA*.



**Figure 6.** Dispositif de pesage des touches.

Toutefois s'il s'agissait véritablement d'une masse en translation, avec son contrepois, déplacée à vitesse lente vers une autre position elle devrait n'en plus bouger. Ce n'est pas le cas. Le dispositif a plutôt tendance à osciller très légèrement et à revenir (sensiblement) à la position d'équilibre qu'il avait au départ : tout se passe comme s'il y avait une force de rappel vers cette position. Un ressort *CORDIS-ANIMA*, *RES*, de raideur  $K_{TGR}$  pourrait donc en première approximation modéliser cette propriété. Mais, on note de plus la présence d'une viscosité qui fait que l'oscillation s'arrête. Appelons  $Z_{TGR}$  son coefficient. Une campagne de mesure soigneuse nous donne une estimation des paramètres  $K_{TGR}$ , et  $Z_{TGR}$ <sup>11</sup>. On peut ainsi proposer un premier modèle de la touche de *TGR* sous la forme d'une cellule *CEL* du formalisme *CA*, avec trois paramètres,  $M_{TGR}$ ,  $K_{TGR}$ , et  $Z_{TGR}$ . Ce modèle, bien que très simple, est une première étape du processus itératif que l'on abordera plus loin dans le §5.3 « Métrologie spéculaire ».

### 5.2.2. Modélisation - Émulation du geste

« Le Temps ne se définit pas, il s'écoule » selon l'expression prêtée à A. Einstein. De même, on pourrait dire le Geste ne se modélise pas, il s'exerce ! Certes, mais nous n'allons pas nous arrêter là dans notre projet d'émuler le geste. On se propose de le remplacer également par un modèle en *CORDIS-ANIMA*.

En effet, avec *GENESIS*, hors ligne, et sans possibilité d'intervention gestuelle réelle aucune, et même en temps totalement différé, nous parvenons à mettre les éléments matériels *<MAT>* en mouvement en leur donnant des positions et vitesses initiales ( $X_0$  et  $V_0$ ). En situation hors ligne et où aucun signal « position » ou « force » n'a été pré stocké, on n'a de possibilité que celle de choisir les conditions initiales des éléments *<MAT>* du modèle. Si l'on déplace le concept et que

<sup>10</sup> Ce moteur est le moteur « plat » objet d'un brevet ACROE [7].

<sup>11</sup> Notons que l'estimation du coefficient de viscosité est plus délicate que celle du coefficient d'élasticité

l'on imagine les conditions initiales, indépendamment de l'instant où elles s'appliquent mais comme une singularité temporelle, et si nous désignons toute singularité temporelle par le terme « d'événement », la question devient alors : *comment représenter (décrire, écrire) les conditions correspondant à l'occurrence d'un événement, i.e. d'une singularité temporelle dans un univers où les processus découlent implacablement de lois prescrites au début de toutes choses ?*

### 5.2.2.1 Créer l'événement

Il s'agit donc de créer la suite d'événements que l'on souhaite, vue comme une succession de singularités temporelles dont les conditions initiales ne sont qu'un cas particulier.

La façon la plus simple de créer un événement à un instant « T », i.e. une discontinuité parfaitement localisée dans le temps, est, dans cet univers, de faire entrer deux particules en collision. Ceci suppose, que ces deux particules aient un lien, qui soit sans effet avant l'instant T, et qui se manifeste à l'instant T, la manifestation la plus simple étant qu'elles soient alors en interaction viscoélastique. Mais, pour qu'une collision soit exploitable comme un événement, il faut une condition particulière. C'est en l'espèce l'interaction appelée Butée (BUT) dans *CORDIS-ANIMA* qui va la permettre.

Prenons en effet deux particules liées par cette interaction de Butée. Fixons pour la première des conditions initiales de repos à la position « 0 », ( $X_{01}=0$  ;  $V_{01}=0$ ) et plaçons la seconde à une altitude positive  $X_{02}$  avec une vitesse initiale négative  $V_{02}$ . La seconde entre en collision avec la première un temps « T » après le début de la simulation, proportionnel à  $X_{02}$  et inversement proportionnel à  $V_{02}$ . Il suffit alors de donner les valeurs appropriées aux conditions initiales pour provoquer l'événement collision à l'instant T.

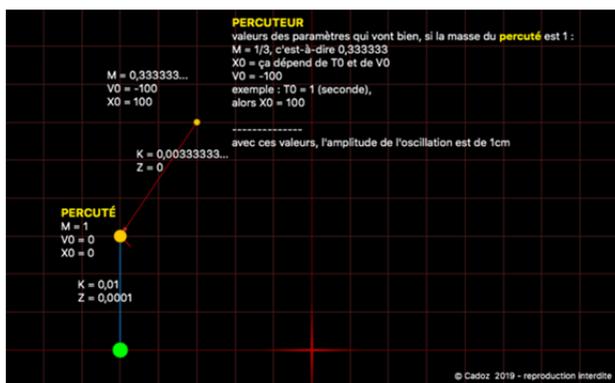


Figure 7. Percuteur / Percuté.

Dans la situation nominale (fig. 7), la particule 1 est passive, la particule 2 active. La seconde peut être qualifiée de « percuteur », la première de « percuté ». Lancer un percuteur dans les bonnes conditions initiales à l'encontre d'une Masse quelconque, par exemple celle de l'émulateur de *TGR* produit, à l'instant T que l'on aura choisi, le départ de cette Masse *TGR* pour un déplacement dans le même sens que le percuteur, à une

vitesse qui peut être calculée avec précision. La suite du mouvement de la touche ne dépend plus alors que des propriétés de celle-ci. Celle du percuteur ne nous intéresse plus. Appliqué à l'émulateur de *TGR*, ce procédé prend la fonction de l'émulateur de geste, le plus simple qui soit.

Nous allons maintenant aborder deux manières complémentaires de provoquer des mouvements plus élaborés des touches (émulées) de *TGR*. La première consiste à penser l'instrumentiste lui-même comme une entité que l'on peut modéliser, la seconde à ramener les mouvements de celles-ci comme conséquences d'une suite de percussions élémentaires.

### 5.2.2.2 Geste balistique

Considérons simplement l'instrumentiste comme un système mécanique composé de solides rigides articulés passifs (le squelette) et de muscles (actionneurs) contrôlés par le cerveau. Sans vouloir modéliser les aspects biologiques, physiologiques ou neuronaux du geste, le phénomène gestuel peut être considéré selon deux aspects complémentaires : l'un de nature structurale, qui correspondrait aux propriétés permanentes de l'instrumentiste, l'autre de nature événementielle, qui correspondrait aux actes dans leur forme essentielle.

Nous avons déjà eu l'occasion de nous en expliquer [5] en appelant « modélisation phénoménologique » la première et « modélisation structurale » la seconde.

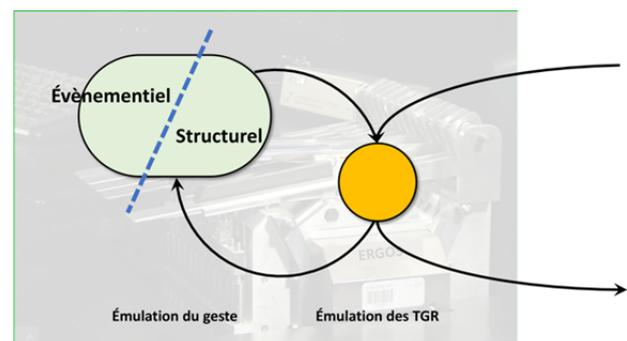


Figure 8. Modélisation du geste – Événementiel / Structurel.

Ainsi il ne s'agit pas de tenter de modéliser l'humain instrumentiste, sa mécanique, sa biologie, sa physiologie ou son cerveau, que l'on pourrait alors impliquer dans une « métrologie », mais de proposer un modèle fonctionnel susceptible de se mettre à la place de lui tout en provoquant les mêmes résultats phénoménologiques, faisant la part entre l'événementiel et le structurel.

Par exemple, la partie structurale pourrait être modélisée de manière simpliste, comme notre *TGR* précédemment, avec un oscillateur physique élémentaire *CA*, et la partie événementielle avec un « percuteur » lancé avec des conditions initiales particulières. Évidemment, rien n'empêche de se livrer à un travail de modélisation approfondi.

De ceci, tirons deux choses pour la suite : il y a cette part « événementielle », qui peut alors porter la part « décisionnelle » de l'instrumentiste (il décide du

moment où son action aura une conséquence) ; mais il y a aussi cette part « balistique », liée aux propriétés structurelles invariantes dans le temps, qui, en quelque sorte se développe sans que l'instrumentiste n'y puisse plus rien.

En conséquence, nous pouvons alors nous attacher à une question unifiant les deux aspects : *comment engendrer l'événement, plus généralement les suites d'événements qui nous permettront une « narration gestuelle » ?*

### 5.2.2.3 Geste narratif

Nous appliquons le qualificatif « narratif » par opposition au « balistique » qui précède. Dans le « balistique », un déterminisme existe en dehors de la volonté de l'instrumentiste. Une partie de ce qui survient lui échappe, même s'il réitère et resserre ses percussions.

Nous appelons le « geste narratif », ou plus précisément la partie narrative du geste imité, les événements qui doivent être réalisés au fil du temps afin de déterminer avec précision, à chaque instant, la valeur d'une variable choisie. Ici, la variable est la position du point matériel représentant le TGR ou son émulateur, donc de générer le mouvement d'un TGR ou de son émulateur *afin qu'il suive un profil narratif arbitrairement choisi.*

Ce profil peut être décrit par une séquence de positions « Xi » à des instants « Ti », que l'on appellera « GN » notée comme suit :

$$GN = (T_i, X_i) ; i \in \mathbb{N} \quad (1)$$

Les différents instants  $T_i$  ne sont pas nécessairement régulièrement espacés.

Dans le paragraphe suivant, nous proposons une méthode d'engendrement d'une telle séquence fondée sur la généralisation de celle utilisée plus haut pour créer un événement isolé.

### 5.2.2.4 Jets de particules à faible inertie et haute vitesse

Précédemment, nous avons lancé un *percuteur* dans de conditions initiales appropriées à l'encontre de la Masse de l'émulateur de TGR. Ceci a produit à l'instant  $T$  choisi le départ de cette Masse TGR pour un déplacement dans le même sens que le percuteur, à une vitesse que l'on peut calculer à partir des deux équations correspondant respectivement à la conservation de la quantité de mouvement et de la quantité d'énergie du système constitué par les deux particules (les chocs étant considérés sans dissipation). Soient alors  $m$  et  $M$  les inerties respectives du percuteur et du percuté,  $v$  et  $V$  leurs vitesses avant la collision,  $v'$  et  $V'$  leurs vitesses après la collision. Avec les conditions initiales données : repos à la position « 0 », ( $X_0=0$  ;  $V_0=0$ ) pour le percuté, altitude positive  $x_0$  avec une vitesse initiale négative  $v_0$  pour le percuteur, les calculs donnent :

$$\begin{cases} v' = \frac{(m-M)v + 2MV}{m+M} \\ V' = \frac{2mv + (M-m)V}{m+M} \end{cases} \quad (2)$$

Une simplification intéressante se présente si l'on prend une valeur très petite pour la seconde particule, le percuteur, par rapport à celle du percuté. On obtient :

$$\begin{cases} v' \approx -v \\ V' \approx V + 2\frac{m}{M}v \Leftrightarrow v \approx \frac{M}{2m}(V' - V) \end{cases} \quad (3)$$

Le percuteur rebondit et part en direction opposée avec une vitesse sensiblement égale en module à sa vitesse incidente. Le percuté, quant à lui, voit sa vitesse augmentée de la quantité :

$$\Delta V \approx 2\frac{m}{M}v \quad (4)$$

On peut considérer ce résultat sous l'angle des quantités de mouvement : la quantité de mouvement du percuté est augmentée de deux fois celle du percuteur ; ce qui se comprend bien en considérant que la quantité de mouvement du système global doit être conservée et que celle du percuteur s'est inversée en signe.

Notons que la vitesse élevée de la particule incidente a également l'intérêt majeur de rendre négligeable l'erreur sur l'instant de l'impact liée au fait que le percuté n'est alors pas forcément à l'altitude « 0 » à cet instant.

### 5.2.2.5 Les « ergons » et « l'échantillonnage ergonomique »

Nous appelons "ergons" de telles particules ayant une inertie très petite et une vitesse très élevée, donc une énergie finie. Notons que nous pouvons régler cette énergie à travers le rapport  $m/M$  et la vitesse  $v$ , afin qu'elle soit à l'échelle de l'énergie gestuelle.

Pour donner la direction de l'effet de l'*ergon* sur le percuté, il suffirait de le lancer par-dessus (avec une vitesse négative) ou par dessous celui-ci (avec une vitesse positive). Une autre approche consiste à lancer tous les *ergons* par-dessus avec une vitesse négative, mais en changeant le signe de leur inertie ainsi que du ressort de Butée de collision lorsque la particule devrait être lancée par dessous avec une vitesse positive. Cette approche est plus fondamentale car elle situe le procédé au niveau de la modélisation structurelle et elle permet à loisir d'ajouter ou d'enlever une quantité de mouvement donnée au percuté. Nous appelons « *échantillonnage ergonomique* » ce jeté d'*ergons* « positifs » et « négatifs » aux instants  $T_i$ . On le note comme suit :

$$Gerg = (T_i, -|v_i|) ; i \in \mathbb{N} \quad (5)$$

où les vitesses  $v_i$  sont calculées à partir de l'expression (3), mais en changeant leurs signes, ainsi que ceux de l'inertie et du ressort de butée des *ergons*, lorsqu'elles sont positives. Ainsi, en partant de la suite des positions données dans la relation (1) et disposant d'un modèle du TGR (qui permettra le calcul de  $V$  et

V') nous sommes en mesure d'obtenir exactement le profil de mouvement que nous recherchons avec le *TGR* émulé. Nous pouvons donc, imiter un vrai geste appliqué au vrai *TGR*, et obtenir hors ligne le même mouvement que nous avons en ligne et en temps réel.

La méthode peut être généralisée à des modèles de *TGR* plus complexes qu'une CEL dès lors que nous disposons d'un modèle analytique de celui-ci, au moyen de la méthodologie de métrologie spéculaire décrite au § 5.3 qui suit.

Ainsi, nous sommes capables de simuler physiquement ce que nous avons appelé dans des « gestes ergotiques » [3, 4, 9]. Ces *gestes ergotiques simulés* peuvent prendre leur place légitime dans des simulations hors ligne et en temps différé et, en outre, sont capables d'interagir avec des gestes ergotiques réellement effectués.

### 5.3. Métrologie spéculaire

Le dispositif opératoire est constitué d'une station de simulation multi sensori-motrice temps réel équipée du logiciel *G-IV*, fonctionnant en ligne avec un système *TGR*. Une première phase de mesure réelle, avec des appareils de mesure précis et calibrés permet de donner une approximation du premier ordre de chaque touche *TGR* sous la forme d'une Cellule CA, c'est-à-dire d'un oscillateur physique élémentaire, dont on définit les paramètres M, K et Z à partir des mesures et qui constitue une première émulation.

Les *TGR* réel et émulés peuvent alors être soumis simultanément au même geste émulé selon la méthode que l'on vient de décrire. Le *TGR* réel est alors sans instrumentiste, mais il se retrouve excité par le geste émulé (par le jet d'*ergons*). Si les deux systèmes étaient parfaitement identiques - c'est-à-dire si notre *TGR* émulé était une représentation parfaite du *TGR* réel - soumis à des gestes dont on est maintenant certain qu'ils sont parfaitement identiques, ils devraient adopter rigoureusement le même comportement. Ceci, on l'imagine, n'arrive pas tout de suite. Il y a une cascade de raisons pour que ce ne soit pas le cas.

#### 5.3.1. Calibration

La première est que les forces et les positions au sein des *TGR* réels auxquelles on accède avec les appareils de mesure subissent un certain nombre de traitements depuis ou avant leur présence sous la forme d'un point  $\langle M_{TGR} \rangle$  dans la modélisation. L'un d'eux se place au niveau même des capteurs et effecteurs, puis à celui des électroniques qui conditionnent leurs signaux, en entrée ou en sortie. La seconde raison est liée au fait que les grandeurs physiques dans le monde réel et leurs vis-à-vis dans le monde simulé ne sont pas nécessairement en concordance. Dans le monde réel, on a utilisé une balance, un double décimètre et un chronomètre, qui donnent des valeurs exprimées en unités du système SI (MKS). Dans le monde simulé nous avons affaire aux nombres qui représentent les grandeurs issues des

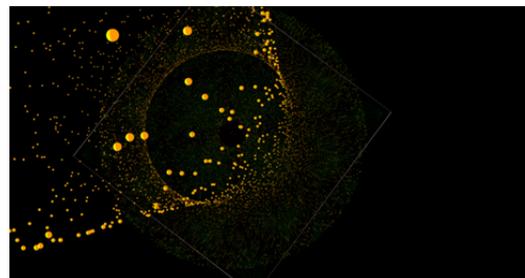
calculs numériques dépendant de celles que l'on a données aux paramètres et conditions initiales. Elles ne se correspondent pas nécessairement, mais on peut décider d'une correspondance conventionnelle en agissant sur les deux calibrages consécutifs qui se trouvent dans les chaînes complètes d'entrées et de sortie, l'un dans l'électronique, l'autre en périphérie des calculs de simulation. Par exemple, on pourra faire en sorte qu'un déplacement de 1cm de la touche d'un *TGR* corresponde à une variation de 0,01 de la variable de position qui le représente dans la simulation. Cette procédure peut s'appliquer pour chacune des grandeurs en jeu. Cette étape de calibration permet alors de maîtriser précisément la correspondance entre les grandeurs réelles et les grandeurs virtuelles, inerties, raideurs, viscosités, déplacements, forces en jeu dans les deux mondes, réel et simulé.

#### 5.3.2. Émulation complète

Pour l'émulation complète d'un *TGR*, il convient ensuite de procéder par étapes en commençant par l'émulation gestuelle la plus simple (§5.2) plus haut, qui va en fait nous donner la réponse impulsionnelle des deux systèmes, le système réel et le système émulé. Ceci permet d'affiner l'estimation de K et de Z<sup>12</sup> sachant que le *TGR* réel ne possède probablement pas un seul mode vibratoire et que, même si elles ne correspondent qu'à son premier mode, l'élasticité, de même que la viscosité ne sont probablement pas linéaires. Pour traiter la question de la complexité modale, on peut ajouter au modèle de mesure un analyseur modal étalonné constitué d'un banc de Cellules CA qui donnera une idée des modes à ajouter au fondamental et que l'on pourra inclure dans l'émulateur.

## 6. QUETZALCOATL - INTER-INSTRUMENTALITÉ ET SPECULARITÉ INSTRUMENTALE

Bien que la création ne soit pas en elle-même une métrologie, les méthodologies de la métrologie ne sont pas si étrangères aux paradigmes à l'œuvre dans le processus de création.



<sup>12</sup> Il n'est pas utile d'entrer dans le détail ici car c'est la pratique qui est la meilleure description possible.



**Figure 9.** Jets de particules « *Ergons* » dans *Quetzalcoatl* et « *Gong déchiré* » dans *Hélios*.

La pièce musicale *Quetzalcoatl* est entièrement conçue avec *GENESIS* (fig. 9). Elle met en œuvre une première forme de dualité entre un très vaste modèle *CORDIS-ANIMA* composé de plus de 230 000 modules, simulé en temps différé, et une sous-partie de ce modèle simulée et contrôlée par 12 touches du *TGR* en temps réel. Ces deux parties sont diffusées et jouées sur la station *Hélicanthe*. Pendant la performance, la partie pré-calculée est diffusée sur les 24 canaux audio d'un dôme sonore en synchronicité avec l'affichage visuel des mouvements 3D de tous les modules <MAT>. *GENESIS* permet une navigation interactive en temps réel au sein de la scène 3D visualisée. La scène temps réel est jouée en direct par deux instrumentistes sur deux vrais *TGR* et, *last but not the least* : les *TGR* sont couplés, permettant aux instrumentistes de jouer ensemble sur un instrument virtuel partagé en sentant les gestes de l'autre.

Le modèle en temps différé est composé d'un premier ensemble de structures vibrantes de 10 000 oscillateurs indépendants (nostalgie de la synthèse additive !), dont tous les emplacements sont dispersés au hasard sur une plage de fréquences qui va de 20Hz à 10KHz. Ces oscillateurs sont placés géométriquement radialement sur l'établi *GENESIS* à des distances inversement proportionnelles à leur hauteur (en cents) et placés à des positions angulaires aléatoires.

Un deuxième ensemble de structures vibrantes est composé de modules <MAT> interconnectés. Il y a par exemple un "gong", modélisé comme un disque maillé hexagonalement, dont les nœuds sont des modules MAS et les arcs reliés par des liaisons viscoélastiques REF. Ces dernières sont des REF non linéaires approchant les non-linéarités que l'on rencontre dans les plaques minces et qui sont la cause de l'évolution vers le chaos suite aux percussions insistantes sur dans les gongs ou cymbales.

### 6.1. Projection en spatialité

La projection en spatialité, c'est-à-dire la manière dont tous les points sources (les points <M> dont on utilise les mouvements pour constituer le signal sonore) sont choisis pour être envoyés sur les 24 haut-parleurs se fait en disposant un « Émulateur » du dôme sonore sur l'établi. Le concept est simple. Les sorties sonores dans *GENESIS* se font par des modules appelés <SOF>, pour « sortie force ». Ceux-ci, de la catégorie <MAT> reçoivent la somme des forces de tous les éléments

<LIA> qui s'y rattachent et la transmet à la voie de sortie audio qui lui est affectée. En plaçant ces éléments <SOF> selon une disposition isomorphe à celle des haut-parleurs dans l'auditorium, on peut alors sans peine affecter les différents points source de la scène à ces haut-parleurs.

En résumé, dans *Quetzalcoatl*, pour la partie hors ligne, tout se passe comme si une immense « galette » (ou une minuscule galaxie) d'oscillateurs était au-dessus de nos têtes, les plus graves sonnantes vers la circonférence, les plus aigus vers le centre (au bord du trou noir).

La même disposition adoptée pour le gong place également celui-ci au-dessus de nos têtes ; cette fois, ce sont non pas les hauteurs qui sont projetées dans l'espace, mais les lieux d'impact sur ce « *Gong-Dôme* ».

### 6.2. « Instrumentalité spéculaire », « inter-instrumentalité »

Le jeu temps réel n'est possible que sur les objets de petite taille et les objets de grande taille ne peuvent être calculés qu'en temps différé. Nous allons alors émuler les systèmes gestuels dans le grand modèle. L'idée la plus simple étant de dupliquer les *TGR* du modèle temps réel et de les transporter, aux mêmes emplacements dans le grand modèle matrice. On voit alors l'intérêt que peut avoir l'émulation gestuelle dans ses deux aspects : permettre un jeu à l'identique dans la situation en ligne et dans la situation hors ligne mais aussi, un jeu... différent !

Ainsi, des possibilités variées de dialogue se présentent : tenter de construire par émulation gestuelle une performance réelle exécutée antérieurement, ou inversement, proposer une narration dans une émulation gestuelle faite en avance et proposer à la performance de dialoguer avec celle-ci. On appellera cela « instrumentalité spéculaire ».

Et enfin, dernière forme de dualité, celle que l'on va appeler « l'inter-instrumentalité » : plaçons entre deux *TGR* distincts un élément de simulation <LIA> qui les couple entre eux. Par exemple un Ressort RES. Alors, les deux *TGR* ainsi reliés vont devenir mécaniquement dépendants. Tout ce qui sera fait sur l'un pourra « être retenu contre l'autre ». Moins conflictuellement, il peut s'installer ici une circonstance instrumentale sans antécédent et impossible dans la réalité : le geste de chaque instrumentiste devient perceptible gestuellement par l'autre, et les deux musiciens peuvent collaborer gestuellement, en amont même de toute conséquence sur le discours sonore. Cette circonstance s'avère particulièrement riche. On peut imaginer son application à l'apprentissage, où l'un des deux instrumentistes guide l'autre dans la bonne manière de faire s'exprimer un modèle. Mais au-delà, ses conséquences au niveau du jeu instrumental musical et de la création sont particulièrement prometteuses.



Figure 10. Inter-Instrumentalité, dans *Quetzalcoatl*.

## 7. EN CONCLUSION - ÉCRITURE DU GESTE

L'ensemble de ces aspects, celui en particulier de « l'échantillonnage ergonomique » prolonge la piste de l'écriture du geste que l'on a introduite par ailleurs, composante de la situation post-scriptique dans laquelle nous nous trouvons aujourd'hui, où instrumentalité et écriture, du fait de l'ordinateur, se trouvent dans un lien fort et nouveau [1, 2, 8]. Ainsi, le geste peut être écrit, dans un formalisme complet, univoque, reproductible, transmissible. Notons cependant que la dialectique geste-instrument demeure entière, et le contraire serait gênant pour le concept. En effet, nous l'avons noté aussi, le geste instrumental ne peut s'étudier séparément de l'instrument auquel il s'applique [3, 4]. La façon dont ceci se confirme ici est dans le fait que ce que fera un « ergon » au TGR qu'il sollicite est, cela se voit dans les expressions mathématiques, dépendant des propriétés de ce TGR et, au-delà des propriétés de l'instrument simulé. Ceci transpose le problème dans ses dimensions essentielles qui sont celles de l'interaction : étant donné une suite d'états voulus pour un TGR, spécifiée par une suite  $(T_i, X_i)$  (§5.2.2.3), il nous faut connaître les propriétés du TGR pour déterminer la suite  $(T_i, v_i)$  des vitesses à donner aux particules du jet « ergonomique » qui vont lui imposer ce mouvement.

Ceci confirme la nécessité de disposer de systèmes à retour d'effort performants et de méthodologies sérieuses pour les construire, les caractériser qualitativement et quantitativement, et les mettre en scène en création musicale et multi sensori-motrice.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ici ma profonde reconnaissance à mes fidèles compagnons, Annie Luciani et Nicolas Castagné qui mènent avec moi depuis si longtemps tous ces travaux dédiés aux concepts et aux technologies numériques de la création musicale, visuelle et de l'art du mouvement. Ensemble, nous avons franchi tellement d'étapes, et tellement de projets nous animent toujours.

## REFERENCES

[1] Cadoz C. « Instrumentalité, écriture, technologie numérique : une dynamique supra-instrumentale et

méta-scriptique du processus de création musicale », *Créativité Instrumentale et Créativité Ambiante : Colloque Art-Science-Technologie 2011*. Enactive Systems Books publisher, Grenoble, 2012. [ISBN 978-2-9530856-1-7.]

- [2] Cadoz C. « Supra-Instrumental Interactions and Gestures », *Journal of New Music Research* 38/3 (2009), p. 215-230.
- [3] Cadoz, C. « Continuum énergétique du geste au son : simulation multisensorielles d'objets physiques ». *Interfaces homme-machine et création musicale*, Vinet, H., Delalande, F. (dir.). Hermes Ed. Paris, 1999.
- [4] Cadoz, C. « Le geste, canal de communication homme/machine. La communication instrumentale », *TSI* 13/1 (1994), p. 31-61.
- [5] Cadoz, C. « Simuler pour connaître / Connaître pour simuler », Actes colloque « *Modèle physique, création musicale et ordinateur* », ACROE, Grenoble, 1990, Edition Maison des Sciences de l'Homme, Paris, collection Recherche, musique et Danse I, 1994.
- [6] Cadoz, C., Luciani, A., Florens, J-L. « CORDIS-ANIMA: a Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis - The General Formalism », *Computer Music Journal* 17/1 (1993).
- [7] Cadoz, C., Luciani, A., Florens, J-L. « Synthèse musicale par simulation des mécanismes instrumentaux. Transducteurs Gestuels Rétroactifs pour l'étude du jeu instrumental », *Revue d'Acoustique* 59 (1981), p. 279-292.
- [8] Cadoz, C., Ramstein, C. « Capture, Representation and Composition of the Instrumental Gesture », *International Computer Music Conference*, Glasgow, 1990.
- [9] Cadoz, C., Wanderley, M. « Gesture and Music », *Trends in Gestural Control of Music*, Wanderley, M., Battier, M. (dir.). IRCAM, Paris, 2000.
- [10] Castagné, N., Cadoz, C. « GENESIS: A Friendly Musician-Oriented Environment for Mass-Interaction Physical Modeling », *Proceedings of International Computer Music Conference*, Goteborg, Sweden, 2002.
- [11] Evrard, M., Luciani, A., Castagné, N. « Mimesis : Interactive interface for mass-interaction modeling », *CASA'06 Proceedings*, Computer Graphic Society, Geneva, 2006, p 177-186.
- [12] Burdea G. C. *Force and touch feedback for virtual reality*. John Wiley & Sons, Hoboken, 1996.
- [13] Hiller, L. A. « Computer Music », *Scientific American* 201 (1956).

- [14] Florens J.-L., Luciani A., Cadoz C., Castagné N. « ERGOS: Multi-degrees of Freedom and Versatile Force-Feedback Panoply », Proceedings of EuroHaptics, Munich, Germany, 2004.
- [15] Kurtag G. « Intervention au débat « Pourquoi ré-introduire la matérialité et le corps dans la création numérique ? » », AGORA Creative 2019, Grenoble, 2019. [agora-creative.acroeuca.org/results\_evenements/?\_sft\_cat\_evenement=conferences-debats.]
- [16] Luciani, A., « Art kinesthésique et art plastique : Contribution à l'émergence d'un art visuel dynamique », *Créativité Instrumentale et Créativité Ambiante : Colloque Art-Science-Technologie 2011*. Enactive Systems Books publisher, Grenoble, 2012. [ISBN 978-2-9530856-1-7.]
- [17] Luciani, A., Evrard, M., Castagné, N., Couroussé, D., Florens, J.-L., Cadoz, C. « A Basic Gesture and Motion Format for Virtual Reality Multisensory Applications », Proceedings of the 1st international Conference on Computer Graphics Theory and Applications, Setubal, Portugal, 2006.
- [18] Luciani, A., Florens, J.-L., Couroussé, D., Castagné, N. « Ergotic Sounds: A New Way to Improve Playability, Believability and Presence of Virtual Musical Instruments », *Journal of New Musical Research* 38 (2009), p. 303-332.
- [19] Mathews, M., Miller, J. E., Moore, F. R., Pierce, J. R., Risset, J.-C. *The Technology of Computer Music*. MIT Press, Cambridge (MA), 1969.
- [20] Risset, J.-C., Wessel, D. « Exploration du timbre par analyse et synthèse », *Le timbre, métaphore pour la composition*, Barrière J.-B. (dir.). Christian Bourgois, Paris, 1991.
- [21] Risset J.-C., Grabocz, M. (dir.) *Jean-Claude Risset, Ecrits - vol. 1, 2 et 3*, Hermann, Paris, Collection GREAM « Création contemporaine », 2014, 2019, 2020.
- [22] Wessel, D. L. « Timbre Space as a Musical Control Structure », *Computer Music Journal* 3/2 (1979), p. 45-52.

*Texte édité par Tom Mays*